中国生态农业学报 2016 年 11 月 第 24 卷 第 11 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Nov. 2016, 24(11): 1435−1444

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160279

灌溉方式与秸秆覆盖优化施氮模式对秸秆腐熟特征及水稻氮素利用的影响*

严奉君[1] 孙永健[1**] 马 均[1**] 徐 徽[1] 李 玥[1] 代 邹[1]
杨志远[1] 蒋明金[1] 孙圆圆[2]

(1. 四川农业大学水稻研究所/农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室 温江 611130;
2. 中国气象局成都高原气象研究所 成都 610072)

摘 要 以杂交籼稻'F 优 498'为试验材料, 研究不同灌溉方式[淹水灌溉(CK)、干湿交替灌溉、旱作]下氮肥运筹与秸秆覆盖优化管理模式(麦秆覆盖优化施氮模式、油菜秆覆盖优化施氮模式以及无秸秆覆盖优化施氮模式)对水稻根系生长、各时期氮素积累以及产量的影响, 探讨各灌溉方式下秸秆腐熟及氮素释放规律, 明确秸秆腐熟与氮素释放规律对水稻生长的影响及其相关关系。结果表明, 淹水灌溉和干湿交替灌溉均较旱作有效地协调各时期水稻地上部、地下部生长, 促进各时期氮素吸收利用, 提高稻谷产量; 而水分生产效率则以旱作为最优, 干湿交替灌溉次之, 但差异不显著。麦秆、油菜秆的腐熟与氮素释放效率最高峰均出现在移栽后 30 d, 但腐熟量与氮素释放量受灌溉方式与秸秆种类的影响; 油菜秆腐熟量显著高于麦秆, 旱作明显高于干湿交替与淹水灌溉; 氮素释放量则以麦秆为最优。秸秆覆盖优化管理模式也对水稻各生长指标具有显著影响; 淹水及干湿交替灌溉下, 麦秆覆盖氮肥运筹优化管理模式有效协调水稻植株各时期的生长, 促进氮素吸收利用, 最终实现产量的增加; 油菜秆覆盖氮肥运筹优化管理模式则在整个生育期均对水稻生长表现轻微抑制效应; 而旱作模式下麦秆、油菜秆优化施氮模式覆盖均呈现显著的促进作用, 其中油菜秆覆盖优势明显, 可作为生产中水资源不足的情况下参考。秸秆腐熟量及氮素释放量与水稻根干重、氮素吸收利用以及产量的相关性分析表明, 移栽后 30 d 秸秆腐熟量与稻谷产量、氮素吸收均呈显著的负相关关系(r=−0.27*~−0.29*), 而齐穗期、成熟期氮素释放量与产量及氮素吸收均呈显著的正相关关系(r=0.31*~0.59**); 同时, 秸秆的腐熟量与氮素释放对水稻根冠比影响较大, 其中以齐穗期最为显著(r=−0.27*~0.42**)。协调水稻各时期秸秆腐熟量及氮素释放, 特别是移栽后 30 d 氮素释放量是保证实现水稻高产、高效的重要措施之一。

关键词 水稻 秸秆覆盖 氮肥运筹 灌溉模式 秸秆腐熟 秸秆氮素释放 氮素利用
中图分类号: S511.062.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)11-1435-10

Effects of irrigation method and straw mulch-nitrogen management pattern on straw decomposition characteristics and nitrogen utilization of hybrid rice*

YAN Fengjun[1], SUN Yongjian[1**], MA Jun[1**], XU Hui[1], LI Yue[1], DAI Zou[1],
YANG Zhiyuan[1], JIANG Mingjin[1], SUN Yuanyuan[2]

(1. Rice Research Institute of Sichuan Agricultural University / Key Laboratory of Southwest Crop Physiology, Ecology and

* 国家"十二五"科技支撑计划项目(2011BAD16B05, 2012BAD04B13, 2013BAD07B13)、四川省科技支撑计划项目(2014NZ0041, 2014NZ0047)和四川省育种攻关专项(2011NZ0098-15)资助
** 通讯作者: 马均, 主要研究水稻高产高效优质栽培, E-mail: majunp2002@163.com; 孙永健, 主要研究水稻高产高效优质栽培, E-mail: yongjians1980@163.com
严奉君, 主要研究水稻高产优质高效栽培。E-mail: yfjun1989@126.com
收稿日期: 2016−03−24 接受日期: 2016−05−06

* This research was supported by the National Technology R&D Project of China (2011BAD16B05, 2012BAD04B13, 2013BAD07B13), Sichuan Province Technology R&D Program (2014NZ0041, 2014NZ0047) and the Breeding Research Project in Sichuan Province (2011NZ0098-15).
** Corresponding authors: MA Jun, E-mail: majunp2002@163.com; SUN Yongjian, E-mail: yongjians1980@163.com
Received Mar. 24, 2016; accepted May 6, 2016

Cultivation, Ministry of Agriculture, Wenjiang 611130, China; 2. Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu 610072, China)

Abstract Irrigation methods have both direct effect and remote effect (through straw decomposition and nitrogen release especially when integrated with nitrogen management) on rice growth. A field experiment was conducted to evaluate the effect of irrigation methods and optimal straw mulch-nitrogen management pattern on root growth, nitrogen accumulation at main growth stages and grain yield of hybrid rice. Also straw decomposition and nitrogen release mechanisms were probed to clarify the effects of the interaction of straw decomposition and nitrogen release on rice growth. The results showed that flooding irrigation (W_0) and alternate wetting and drying irrigation (W_1) methods generally coordinated aboveground growth with underground growth, promoted nitrogen accumulation and increased grain yield compared with drought farming (W_2). However, the water productivity in W_2 treatment was the highest among all treatments, followed by W_1. For wheat and rape straw decomposition and nitrogen release, the peak values occurred 30 days after transplanting (30 DAT). However, the degree of decomposition and nitrogen release were influenced by both irrigation methods and straw types. The rape straw under W_2 treatment had larger degree of decomposition, while wheat straw under W_1 led to more nitrogen release. For straw mulch-nitrogen management patterns, wheat straw combined with optimal nitrogen management (S_1N_1) under W_0 and W_1 treatments efficiently coordinated the growth, promoted nitrogen absorption and eventually increased grain yield. However, rape straw combined with optimal nitrogen management (S_2N_1) had a slight inhibitory effect on the whole growth. Under drought irrigation, S_1N_1 and S_2N_1 had positive and remarkable effects on growth. Correlation coefficients showed that the effect of the degree of straw decomposition on the 30DAT was significantly negatively correlated with yield and nitrogen accumulation (r = -0.27^* to -0.29^*). Also the effect of the degree of nitrogen release at heading and ripening stages was strongly positively correlated with yield and nitrogen absorption (r = 0.31^* to -0.59^{**}). Also the effects of the degrees of straw decomposition and nitrogen release on root and shoot growth was strong, especially for the heading stage (r = -0.27^* to -0.42^{**}). The results suggested that it was important for high grain yield and high efficiency of rice production to coordinate the straw decomposition and nitrogen release at different growth stages of rice, especially at 30 days after transplanting.
Keywords Rice; Straw mulch; Nitrogen management; Irrigation method; Straw decomposition; Straw nitrogen release; Nitrogen utilization

水稻(*Oryza sativa*)是我国主要的粮食作物，保证稻谷产量的增长，是我国粮食安全的重要保障。近年来我国稻谷产量均实现逐年增长的趋势，但其也伴随着水肥尤以水氮用量急剧增加，水氮利用效率急剧降低，进一步加重我国水资源短缺以及水稻生产成本[1]。同时我国南方水稻种植区也多为两熟或多熟制，因此在水稻茬口衔接过程中，如何高效快捷地处理前茬作物秸秆[2–4]，保障农时，减少环境污染与资源浪费，实现秸秆、水氮高效及可持续性利用，越来越迫在眉睫。为此前人对秸秆还田与水、氮管理理论和技术进行了大量的研究[5–7]。研究结果表明，不同水分及氮肥施用处理条件下秸秆还田均能有效地促进水稻的氮、磷、钾的吸收利用，提高稻谷产量及水分利用效率，改善稻田土壤理化性质。但在秸秆还田与水氮具体优化搭配模式对水稻各时期的生长及氮素吸收利用的影响还存在一定分歧；而秸秆覆盖过程中，水氮管理对秸秆腐熟与氮素释放规律也有待进一步研究。水氮管理、秸秆腐熟及氮素释放规律与水稻生长的相互影响关系还鲜见报道。为此，本试验在前期试验的基础上[8–9]，研究不同灌溉模式下秸秆覆盖氮肥优化管理方式对不同种类秸秆的腐熟及氮素释放规律的影响，以及对水稻各时期根系生长、氮素吸收利用与产量的影响；并探讨秸秆覆盖过程中，秸秆各阶段腐熟量及氮素释放量对水稻各生长指标的影响及相关关系，对优化秸秆还田模式，提高氮肥利用效率意义重大。本试验以‘F 优 498’水稻为试验材料，设置不同灌溉方式下氮肥运筹与秸秆覆盖优化管理处理，研究并揭示不同灌溉模式与秸秆覆盖氮肥优化管理模式对水稻氮素吸收利用、产量以及秸秆腐熟与氮素释放规律的影响及其相关关系，以期进一步丰富和补充秸秆还田与氮肥运筹的水肥调控机理，达到保水节肥又高产高效的目的，为油菜(*Brassica campestris*)–水稻、小麦(*Triticum aestivum*)–水稻两熟制地区秸秆还田技术体系提供理论基础和实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2014 年在成都市温江四川农业大学水稻研究所试验田进行。4 月 10 日播种，旱育秧，5 月 18 日移栽，采用前期研究[8–9]提出的宽窄行高产栽

培方式(宽行 40 cm、窄行 26.7 cm、株距 16.7 cm)，单株栽插，并在宽行进行不同作物秸秆覆盖处理，便于秸秆覆盖还田操作。试验田耕层土壤质地为沙质壤土，含有机质 20.08 g·kg^{-1}，全氮 1.26 g·kg^{-1}，碱解氮 95.44 mg·kg^{-1}，速效磷 33.32 mg·kg^{-1}，速效钾 88.46 mg·kg^{-1}, pH 6.40。还田前秸秆含氮量，小麦秸秆为 7.47 g·kg^{-1}，油菜秸秆为 5.33 g·kg^{-1}。全稻季降雨量 7 848 m^3·hm^{-2}。

试验采用 2 因素裂区设计，灌溉模式为主区，前期研究的秸秆覆盖与氮肥优化组合为副区。主区设置 3 种灌溉模式：淹水灌溉(对照，W_0)，水稻移栽后田面一直保持 1~3 cm 水层，收获前 1 周自然落干；控制性交替灌溉(W_1)，浅水(1 cm 左右)栽秧，移栽后 5~7 d 田间保持 2 cm 水层确保秧苗返青成活，无效分蘖期晒田，其后各时期均采用灌水浅水(2 cm 左右)至土壤开小裂后再灌水的交替灌溉；旱种(W_2)，移栽前浇透底墒水，以后旱作管理(全生育期依靠自然降雨)。各小区均使用水泵精确抽取灌渠水进行灌溉，并用水表准确记录各小区灌水量，全生育期小区均为自然落干，不向外排水。副区为麦秆覆盖优化施氮模式、油菜秆覆盖优化施氮模式以及无秸秆覆盖优化施氮模式，分别记为 S_1N_1、S_2N_1、S_0N_1。两种作物秸秆均为异地秸秆全量还田(小麦秸秆 5 000 kg·hm^{-2}，油菜秸秆 7 000 kg·hm^{-2})。将油菜、小麦秸秆收获后切成 5~10 cm，于水稻移栽后均匀覆盖于宽行间，具体试验设计见表 1。

表 1　不同灌溉方式与秸秆覆盖氮肥运筹优化施氮模式

Table 1　Irrigation methods and straw mulch-nitrogen management patterns of different treatments

处理 Treatment	灌水方式 Irrigation method	秸秆覆盖与氮肥管理模式 Straw mulch-nitrogen management pattern		各生育时期氮肥运筹量 Nitrogen application rate at main growth stages (kg·hm^{-2})			总施氮量 Total nitrogen (kg·hm^{-2})	灌溉水量 Irrigation water (m^3·hm^{-2})
		秸秆覆盖 Straw mulch	氮肥运筹 Nitrogen application	基肥 Basal fertilizer	分蘖肥 Tilling fertilizer	穗肥 Panicle fertilizer		
$W_0S_0N_0$	W_0	S_0	N_0	0	0	0	0	3 931.5
$W_0S_0N_1$	W_0	S_0	N_1	40.5	40.5	54	135	3 931.5
$W_0S_1N_0$	W_0	S_1	N_0	0	0	0	0	3 931.5
$W_0S_1N_1$	W_0	S_1	N_1	40.5	40.5	54	135	3 931.5
$W_0S_2N_0$	W_0	S_2	N_0	0	0	0	0	3 931.5
$W_0S_2N_1$	W_0	S_2	N_1	40.5	40.5	54	135	3 931.5
$W_1S_0N_0$	W_1	S_0	N_0	0	0	0	0	2 243.1
$W_1S_0N_1$	W_1	S_0	N_1	40.5	40.5	54	135	2 243.1
$W_1S_1N_0$	W_1	S_1	N_0	0	0	0	0	2 243.1
$W_1S_1N_1$	W_1	S_1	N_1	40.5	40.5	54	135	2 243.1
$W_1S_2N_0$	W_1	S_2	N_0	0	0	0	0	2 243.1
$W_1S_2N_1$	W_1	S_2	N_1	40.5	40.5	54	135	2 243.1
$W_2S_0N_0$	W_2	S_0	N_0	0	0	0	0	360
$W_2S_0N_1$	W_2	S_0	N_1	40.5	40.5	54	135	360
$W_2S_1N_0$	W_2	S_1	N_0	0	0	0	0	360
$W_2S_1N_1$	W_2	S_1	N_1	40.5	40.5	54	135	360
$W_2S_2N_0$	W_2	S_2	N_0	0	0	0	0	360
$W_2S_2N_1$	W_2	S_2	N_1	40.5	40.5	54	135	360

W_0：淹水灌溉；W_1：干湿交替灌溉；W_2：旱作；S_0：无秸秆覆盖；S_1: 5 000 kg·hm^{-2} 麦秆覆盖；S_2: 7 000 kg·hm^{-2} 油菜秆覆盖；N_0：不施氮；N_1：施氮。下同。W_0: flooding irrigation; W_1: alternate wetting and drying irrigation; W_2: drought irrigation; S_0: no straw mulch; S_1: 5 000 kg·hm^{-2} wheat straw mulch; S_2: 7 000 kg·hm^{-2} rape straw mulch. N_0: no nitrogen fertilizer; N_1: nitrogen fertilizer application. The same below.

施氮量(尿素，含 N 46%)为 135 kg·hm^{-2}，采用基肥∶蘖肥∶穗肥为 3∶3∶4 运筹模式，蘖肥于移栽后 7 d 施用，穗肥于倒 4 叶期一次性施用(具体组合方式见表 1)。磷肥(过磷酸钙)施用量折合 P_2O_5 90 kg·hm^{-2}，钾肥(氯化钾)施用量折合 K_2O 150 kg·hm^{-2}，全部作基肥施用, 3 次重复，小区面积为 15.6 m^2，小区间筑埂(宽 40 cm)，并用塑料薄膜包裹，以防串水串肥。2014 年水稻生长期(4—9 月上旬)降水量及分布、平均温度等气象数据由四川省气象局提供(图 1)。

1.2　测定项目

1.2.1　秸秆腐熟及氮素释放

还田前取一定量还田小麦、油菜秸秆切成 5~

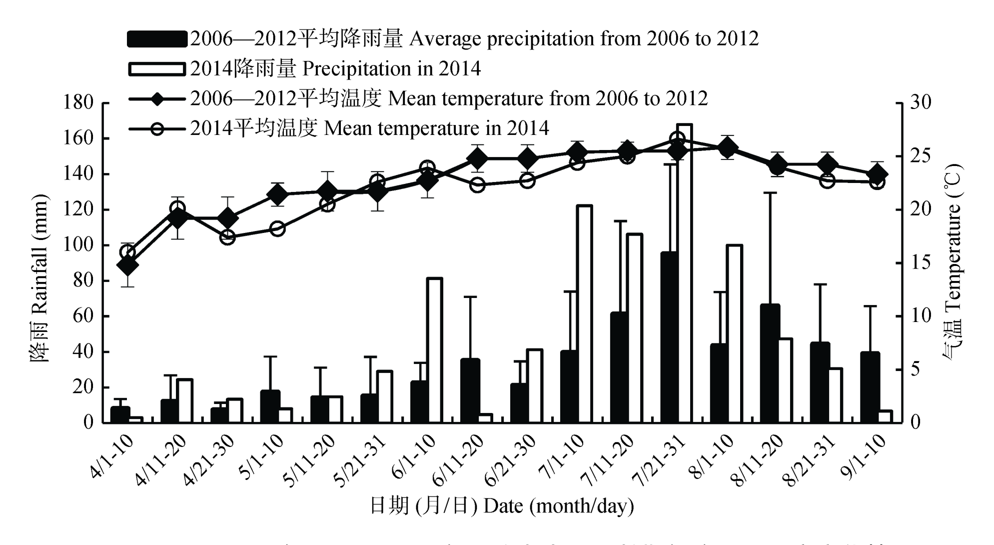


图 1 2006—2012 年平均和 2014 年试验点水稻生长期间降雨及温度变化情况

Fig. 1 Rainfall and temperature in rice season in the experiment site in 2014 and averages of 2006–2012

10 cm，分别置于 40 目尼龙网袋，于移栽前分别覆盖于各小区水稻宽行。移栽前、移栽后 20 d 及 30 d、齐穗及成熟期，各小区随机选取 3 袋，用清水洗净，105 ℃杀青 30 min，在 80 ℃下烘干至恒重，烘干并称重后磨碎成粉(过 80 目筛)，用浓 H_2SO_4 和定氮催化剂消煮，并用 FOSS-8400 凯氏定氮仪测定氮含量。

1.2.2 水稻氮素积累

分别于水稻移栽后 20 d 及 30 d、齐穗及成熟期，按各小区平均茎蘖数取 3 株具有代表性的稻株，分根、茎、叶、穗(齐穗及成熟期)，105 ℃杀青 30 min，在 80 ℃下烘干至恒重。称重后的植株茎、叶、穗磨碎成粉(过 80 目筛)，用浓 H_2SO_4 和定氮催化剂消煮，并用 FOSS-8400 凯氏定氮仪测定氮含量。

1.2.3 水稻根系干重

分别于移栽后 20 d 及 30 d、齐穗及成熟期，按各小区平均茎蘖数取 3 株具有代表性的稻株(以稻株为中心，按 26.7 cm×16.7 cm、深 30 cm 土柱取根)，分别置于 40 目尼龙网袋中用流水冲净，获得完整根系，105 ℃杀青 30 min，在 80 ℃下烘干至恒重。

1.3 参数计算

氮肥回收利用率=(施氮区植株总吸氮量–无氮区植株总吸氮量)/施氮量×100% (1)

氮肥农学利用率=(施氮区稻谷产量–无氮区稻谷产量)/施氮量×100% (2)

氮肥生理利用率=(施氮区产量–无氮区产量)/(施氮区植株总吸氮量–无氮区植株总吸氮量)×100% (3)

结实期茎鞘干物质贡献率=[(齐穗期茎鞘干重–成熟期茎鞘干重)/成熟期穗干重]×100% (4)

秸秆腐熟量=前一时期干重–该时期干重 (5)

秸秆氮素释放量=前一时期氮素含量–该时期氮素含量 (6)

1.4 数据分析

试验数据用 Microsoft Excel 2007、DPS 6.5 与 SPSS 17.0 处理软件分析

2 结果与分析

2.1 灌溉方式与秸秆覆盖优化施氮模式对秸秆腐熟及氮素释放的影响

由表 2 可见，灌溉方式及秸秆覆盖优化施氮模式对秸秆腐熟及氮素释放均呈显著或极显著的影响，且互作效应显著。对比不同灌溉方式，在移栽后 20—30 d，W_0、W_1 下小麦、油菜秸秆的腐熟量及腐熟率均较 W_2 有所降低。而在移栽后 30 d—齐穗期，W_0、W_2 下各秸秆腐熟量差异不显著，但 W_1 明显降低。在氮素释放量以及释放速率方面，W_2 较 W_0 在各生育时期均有明显提高，而与 W1 相比，除在移栽后 30 d 有所提高外，其他各时期差异不明显。不同氮肥优化管理模式下，与 N_0 相比，在移栽后 20—30 d、齐穗期—成熟期，N_1 下麦秆、油菜秆腐熟量均有明显提高，在移栽以后 30 d—齐穗期则明显降低；而氮素释放量则除在移栽后 20—30 d，N_0 较 N_1 有所提高外，其他各时期均以 N_0 最低。但秸秆总腐熟量以油菜秆搭配 N_1 最大，但氮素释放量则麦秆覆盖搭配 N_1 时显著增强。

2.2 灌溉方式与秸秆覆盖优化施氮模式对水稻根系生长的影响

由表 3 可见，灌溉模式与秸秆覆盖优化施氮模式对水稻各时期根干重以及根冠比均呈显著或极显著的影响，且存在显著或极显著的互作效应。对比

表 2　灌溉方式与秸秆覆盖氮肥优化管理模式对秸秆腐熟量及氮素释放量的影响
Table 2　Effects of irrigation methods and straw mulch-nitrogen management patterns on straw decomposition and nitrogen release amount
kg· hm^{-2}

处理 Treatment		腐熟量 Decomposition amount				氮释放量 Nitrogen release amount			
		移栽后 20—30 d 20–30 DAT	移栽后 30 d—齐穗期 30 DAT–HS	齐穗期—成熟期 HS–RS	总腐熟量 Total decomposition accumulation	移栽后 20—30 d 20–30 DAT	移栽后 30 d—齐穗期 30 DAT–HS	齐穗期—成熟期 HS–RS	总氮素释放量 Total N release
W_0	S_1N_0	148.65±45.21e	895.27±32.14b	82.21±42.57e	2 084.97±24.53h	8.55±0.21b	3.03±0.02b	0.41±0.08def	15.37±0.13b
	S_1N_1	330.89±57.98bcde	684.08±29.53cd	275.34±79.18cd	2 310.14±50.27g	6.91±0.34d	6.37±0.07a	0.62±0.14de	17.10±0.38a
	S_2N_0	463.13±62.57abc	830.31±56.43bc	175.51±63.12de	3 325.02±65.32d	5.76±0.32e	1.39±0.21cd	0.67±0.07de	11.14±0.24f
	S_2N_1	408.19±83.95bcd	804.61±91.78bc	381.39±54.25bc	3 608.22±80.09c	7.77±0.56c	0.89±0.87d	0.77±0.05cde	12.48±0.59de
均值 Average		337.71	803.57	228.61	2 832.09	7.25	2.92	0.62	14.02
W_1	S_1N_0	151.36±32.54e	607.93±60.55de	293.70±62.37cd	2 121.71±55.36h	10.19±0.26a	0.32±0.52d	0.05±0.08f	14.44±0.11c
	S_1N_1	307.52±58.43cde	462.54±54.84ef	614.11±97.45a	2 486.88±47.87f	6.33±1.00de	1.30±0.40cd	1.45±0.30a	17.45±0.17a
	S_2N_0	279.47±43.15de	678.08±51.17cd	403.17±38.52bc	3 182.56±48.61e	6.90±0.33d	2.24±0.21bc	1.80±0.09bc	11.81±0.31ef
	S_2N_1	411.06±57.77bcd	544.22±50.40def	490.83±63.25ab	3 434.47±50.69d	6.93±0.69d	5.57±0.60a	1.17±0.18ab	12.54±0.60d
均值 Average		287.35	573.19	450.45	2 806.41	7.59	2.36	1.12	14.06
W_2	S_1N_0	595.94±41.02a	412.27±38.33f	351.63±39.54bc	2 051.03±71.36h	7.90±0.11bc	2.64±0.09b	0.35±0.15ef	13.85±0.24c
	S_1N_1	404.06±24.48bcd	520.39±16.15ef	570.72±36.45a	2 453.89±52.88f	7.72±0.17c	6.18±0.27a	0.88±0.05cd	17.54±0.41a
	S_2N_0	496.24±41.39ab	1 089.16±37.12a	498.75±50.37ab	3 778.96±39.55b	7.85±0.43bc	1.36±0.23cd	0.51±0.15def	12.15±0.31de
	S_2N_1	638.39±35.78a	1 065.90±89.18a	624.67±59.35a	4 023.65±74.14a	6.85±0.83d	5.33±0.54a	1.68±0.16a	15.94±0.25b
均值 Average		533.66	771.93	511.44	3 076.88	7.58	3.88	0.86	14.87
W		15.10^{**}	21.25^{**}	29.56^{**}	47.10^{**}	2.09	14.09^{**}	8.86^{**}	13.45^{**}
SN		4.42^{*}	21.15^{**}	14.59^{**}	949.76^{**}	39.23^{**}	77.63	17.32^{**}	243.15^{**}
W×SN		2.39	13.75^{**}	0.88	19.30^{**}	13.28^{**}	10.23^{**}	7.76^{**}	19.08^{**}

W: 灌溉方式; SN: 秸秆覆盖氮肥优化管理模式。同栏内同列数据后不同字母表示处理间在 5%水平差异显著; *和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著; 下同。W: irrigation method; SN: straw mulch-nitrogen management pattern; 20–30 DAT: 20 to 30 days after the transplanting; 30 DAT–HS: 30 days after the transplanting to the heading stage; HS–RS: the heading stage to the ripening stage. SN: nitrogen-straw mulch management pattern. Values followed by different letters in a column are significantly different at 0.05 level. *, ** indicate significant difference at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively. The same below.

不同灌溉模式而言, W_0 除在成熟期根冠比较 W_2 有明显降低外, 其他时期均较其他各灌溉模式有明显增加, 而 W_1 除在移栽后 20 d 根冠比较 W_2 有明显增加外, 其他各时期均较 W_0、W_2 有所降低。对比各秸秆覆盖氮肥优化处理而言, W_0、W_1 处理均表现为, S_1N_1 在各生育时期其根干重均较对应各灌溉模式有明显提高, 根冠比则呈降低趋势, S_0N_1、S_2N_1 则表现为在生育前中期根干重差异不显著, 而在成熟期则以 S_2N_1 最高。但 W_2 下各秸秆覆盖处理则表现为生育前期其根干重、根冠比与 W_1、W_2 各处理的趋势一致, 但在生育后期则表现为 S_2N_1 处理其根干重较其他各处理有显著提高。

2.3　灌溉方式与秸秆覆盖优化施氮模式对水稻氮素吸收及利用的影响

由表 4 可见, 在不同灌溉方式下, 相对于 W_0, W_1 在生育前、后期氮素积累量、总氮以及氮素回收利用率均有明显提升, 但其生育中期氮素积累量、氮素生理利用率以及氮素农学利用率均有所下降; W_2 则表现为除在生育中期氮素累积量及氮素生理利用率有所提高外, 其他方面均较 W_0 有明显降低。从不同秸秆覆盖与氮肥优化模式来看, 秸秆覆盖对水稻各生育阶段氮素积累及氮素利用均有极显著的影响。在相同灌溉方式下, 不施氮处理在各阶段氮素吸收均较施氮处理显著降低。相对于 S_0N_1 处理, W_0 下 S_1N_1 处理则呈现为在生育前期及后期均有明显降低, 但在生育中期显著高于 S_0N_1 处理; W_1 则表现为与 W_0 相反。而在 W_2 下 S_1N_1 处理与 S_0N_1 相比则表现为施氮在各生育阶段氮素积累量均有显著提高。而 S_2N_1 相较于 S_0N_1 处理, W_0、W_1 不施氮以及 W_2 施氮条件下, 在水稻生育前中期氮素积累量均明显增加, 而在生育后期则有所降低, 其他处理则表现为生育前期有所降低外, 其他时期均明显提高。在氮素利用效率方面, 相对于 S_0N_1 处理, W_1 下 S_1N_1、S_2N_1 均表现为除氮素回收利用率明显提高外,

表 3 灌溉方式与秸秆覆盖优化施氮模式对水稻根干重及根冠比的影响

Table 3 Effects of irrigation modes and straw mulch-nitrogen management patterns on root dry weight and root-shoot ratio of rice

处理 Treatment		根干重 Root dry weight ($g·plant^{-1}$)				根冠比 Root-shoot ratio			
		移栽 20 d 20 DAT	移栽 30 d 30 DAT	齐穗期 Heading stage	成熟期 Ripening stage	移栽 20 d 20 DAT	移栽 30 d 30 DAT	齐穗期 Heading stage	成熟期 Ripening stage
W_0	S_0N_0	0.45±0.09ef	1.17±0.12de	3.30±0.09h	2.17±0.13 fg	0.241±0.002b	0.252±0.014a	0.114±0.005bc	0.039±0.003bc
	S_0N_1	0.67±0.16cd	1.59±0.31ab	6.00±0.13a	3.09±0.62bc	0.175±0.006ghij	0.121±0.025fgh	0.111±0.003c	0.035±0.006cde
	S_1N_0	0.50±0.08def	0.99±0.19efg	3.68±0.08e	2.19±0.09efg	0.230±0.008bc	0.194±0.011bc	0.118±0.006b	0.041±0.005ab
	S_1N_1	0.88±0.07a	1.51±0.28bc	5.21±0.05b	2.86±0.23bcd	0.208±0.035cde	0.125±0.022fgh	0.097±0.005efg	0.031±0.002def
	S_2N_0	0.32±0.08fgh	0.81±0.18ghi	3.56±0.09efg	1.92±0.11gh	0.219±0.011bcd	0.201±0.015b	0.108±0.003cd	0.035±0.002cde
	S_2N_1	0.70±0.12bc	1.60±0.34ab	4.67±0.23d	2.71±0.14cde	0.227±0.020bcd	0.139±0.020ef	0.091±0.005fgh	0.031±0.001def
均值 Average		0.59	1.28	4.40	2.49	0.217	0.172	0.107	0.035
W_1	S_0N_0	0.51±0.05de	0.67±0.11ij	3.55±0.11efg	1.48±0.09hi	0.311±0.012a	0.146±0.010def	0.119±0.009b	0.027±0.005fg
	S_0N_1	0.85±0.07ab	1.68±0.45ab	4.58±0.17d	2.07±0.29fg	0.174±0.012hij	0.123±0.014fgh	0.085±0.002hi	0.023±0.004g
	S_1N_0	0.30±0.07gh	0.55±0.12j	3.71±0.11e	1.80±0.13ghi	0.215±0.008bcde	0.137±0.005efg	0.115±0.011bc	0.032±0.005def
	S_1N_1	0.87±0.11ab	1.77±0.19a	5.20±0.28bc	3.26±0.68b	0.181±0.012fghi	0.129±0.016fgh	0.098±0.008ef	0.035±0.008cde
	S_2N_0	0.37±0.07efgh	0.74±0.17hij	3.41±0.09gh	1.38±0.11i	0.201±0.009defg	0.136±0.011efg	0.102±0.007de	0.023±0.003g
	S_2N_1	0.72±0.11abc	1.82±0.21a	4.98±0.16c	4.42±0.61a	0.160±0.034ij	0.160±0.031de	0.090±0.010gh	0.047±0.006a
均值 Average		0.60	1.21	4.24	2.40	0.207	0.138	0.102	0.031
W_2	S_0N_0	0.40±0.05efgh	0.92±0.11efgh	3.38±0.13gh	1.96±0.22gh	0.203±0.011def	0.168±0.003cd	0.128±0.012a	0.038±0.007bc
	S_0N_1	0.39±0.02efgh	1.33±0.24cd	4.49±0.21d	3.29±0.57b	0.129±0.034k	0.131±0.007fg	0.093±0.005fg	0.040±0.007bc
	S_1N_0	0.31±0.06gh	0.93±0.09efgh	2.96±0.09i	2.06±0.15fg	0.189±0.009efgh	0.168±0.005cd	0.113±0.005bc	0.039±0.004bc
	S_1N_1	0.55±0.01cde	1.14±0.11def	5.34±0.21b	2.55±0.13def	0.152±0.009jk	0.103±0.026h	0.097±0.002efg	0.029±0.001ef
	S_2N_0	0.24±0.05h	0.90±0.13fghi	3.62±0.10ef	1.92±0.21ghi	0.156±0.009ij	0.162±0.012de	0.132±0.009a	0.035±0.007bcd
	S_2N_1	0.46±0.10efg	1.12±0.19def	4.51±0.19d	3.24±0.56bc	0.156±0.006ij	0.112±0.014gh	0.081±0.009i	0.036±0.006bcd
均值 Average		0.39	1.06	4.05	2.50	0.164	0.141	0.107	0.036
W		24.58^{**}	46.26^{**}	364.14^{**}	37.07^{**}	36.58^{**}	28.92^{**}	76.70^{**}	5.55^{**}
SN		22.08^{**}	9.27^{**}	31.02^{**}	0.48	55.25^{**}	26.32^{**}	8.24^{**}	10.73^{**}
W×SN		2.41^{*}	7.42^{**}	26.39^{**}	8.24^{**}	6.72^{**}	9.36^{**}	13.54^{**}	9.77^{**}

其他均有所降低，特别以 S_2N_1 处理最为显著，W_2 下 S_1N_1、S_2N_1 处理表现在氮素回收利用率以及氮素农学利用率均有一定的提高，生理利用效率明显降低的趋势，而 W_1 下 S_1N_1、S_2N_1 处理，除 S_1N_1 在氮素回收利用率方面有所提高外，其他均有所降低。但综合而言，$W_1S_1N_1$ 在氮素总吸收量以及利用方面均有明显的优势。

2.4 相关性分析

通过秸秆腐熟量和氮素释放量对各阶段氮素吸收及总氮积累、氮肥利用效率以及水稻地上地下部生长影响的相关性分析表明(表 5)，在秸秆腐熟量方面，各时期秸秆腐熟量与稻谷产量、氮素积累以及氮素生理利用率均无显著相关关系，但与氮素回收利用率以及各时期根冠比均有明显或显著的相关关系。其中氮素回收利用率与齐穗期、成熟期秸秆腐熟量呈显著的负相关(r=-0.31^{*}与-0.32^{*})；而同时期秸秆腐熟量与根冠比则无显著相关关系，但与其前一期或者后期有显著相关关系(r=-0.28^{*}与-0.32^{*})。氮素释放量方面则表现为，移栽后 20 d、30 d 秸秆氮素释放量与各时期根冠比均呈显著或极显著正相关关系(r=0.27^{*}~0.50^{*})，但与总氮积累、产量、齐穗期以前各生育阶段氮素积累以及氮素生理利用率均呈一定的负相关，其中移栽后 30 d 氮素释放量与产量、总氮积累以及移栽后 20—30 d 氮素积累呈显著的负相关关系(r=-0.27^{*}、-0.29^{*}与-0.28^{*})。而齐穗期、成熟期氮素释放量与产量、总氮积累以及氮素吸收及利用效率均呈显著或极显著的正相关关系(r=0.30^{*}~0.59^{*})，与对应时期根冠比则相关关系不明显。

3 讨论

3.1 灌溉方式与秸秆覆盖优化施氮模式对秸秆腐熟及氮素释放速率的影响

秸秆的腐熟及秸秆所含营养元素的释放速率及

表 4　灌溉方式与秸秆覆盖优化施氮模式对水稻各时期氮素积累及氮素利用效率的影响

Table 4　Effects of irrigation methods and straw mulch-nitrogen management patterns on N accumulation at different growth stages and N use efficiency of rice

处理 Treatment		氮积累量 N accumulation (kg·hm^{-2})				氮肥利用效率 N utilization efficiency		
		移栽后 20—30 d 20–30 DAT	移栽后 30 d—齐穗 30 DAT–HS	齐穗—成熟 HS–RS	总吸氮量 Total nitrogen uptakes	氮素生理利用率 N physiological efficiency (kg·kg^{-1})	氮肥回收利用率 N recovery Efficiency (%)	氮肥农学利用率 N agronomy efficiency (kg·kg^{-1})
W_0	S_0N_0	4.72±0.98f	49.75±1.42ef	43.51±2.42abcde	105.57±1.53fgh	—	—	—
	S_0N_1	27.99±1.01abc	81.04±3.90c	52.01±5.88a	183.06±7.20bc	44.28±3.38bcd	57.40±2.98c	25.08±0.65bc
	S_1N_0	9.70±1.11ef	50.26±1.54ef	41.22±2.02bcde	106.75±3.11fg	—	—	—
	S_1N_1	24.25±6.73bc	95.85±5.90b	41.91±6.44bcdef	185.25±6.41b	43.47±2.32bcd	58.15±3.12c	25.22±0.09ab
	S_2N_0	7.32±2.11ef	57.33±2.14de	29.91±1.42gh	100.99±2.27gh	—	—	—
	S_2N_1	24.90±6.50bc	90.53±5.04b	45.94±6.61ab	177.67±9.43cd	40.89±1.38e	56.80±2.57c	23.21±0.67de
均值 Average		16.48	70.79	42.42	143.21	42.88	57.45	24.5
W_1	S_0N_0	7.00±1.02ef	51.40±0.87ef	36.99±2.13cdefg	105.47±2.24fgh	—	—	—
	S_0N_1	29.07±1.31ab	94.54±2.35b	45.83±7.35ab	187.19±8.77ab	42.70±3.44cd	60.54±2.59ab	25.75±1.51ab
	S_1N_0	8.04±2.14ef	63.42±1.34d	33.61±1.25fgh	109.95±3.13f	—	—	—
	S_1N_1	33.82±4.72a	96.72±3.87b	44.94±3.71abc	192.37±8.12a	43.63±1.37bcd	61.05±3.01a	26.69±1.14a
	S_2N_0	7.81±1.11ef	60.33±2.11d	20.98±1.15i	99.90±2.05h	—	—	—
	S_2N_1	30.19±1.89ab	82.11±4.22c	43.91±5.21abcd	179.08±5.71c	42.37±1.84de	58.65±3.27bc	24.81±0.57bc
均值 Average		19.32	74.75	37.71	145.66	42.9	60.08	25.75
W_2	S_0N_0	7.94±0.79ef	46.84±2.01f	36.28±1.21defg	99.48±3.12h	—	—	—
	S_0N_1	19.95±2.56cd	94.39±2.66b	38.43±6.72bcdefg	169.51±5.14e	44.07±1.76bcd	51.87±1.93d	22.84±0.56e
	S_1N_0	6.99±1.35ef	50.36±1.24ef	34.82±1.05fgh	99.51±2.01h	—	—	—
	S_1N_1	23.24±4.73bcd	95.72±4.80b	32.36±6.06gh	171.66±4.49de	44.39±1.58b	53.44±1.91d	23.71±0.30cde
	S_2N_0	15.25±2.23de	46.56±2.51f	34.92±1.12efgh	101.06±3.11gh	—	—	—
	S_2N_1	23.60±6.89bcd	105.86±3.69a	26.68±3.52hi	171.19±5.79e	46.99±1.64a	51.95±2.39d	24.34±0.41bcd
均值 Average		16.16	73.29	33.92	135.40	45.15	52.42	23.63
W		1.94	2.72	12.49**	36.72**	3.04*	9.54**	5.74*
SN		31.82**	165.32**	10.34**	1 126.77**	0.65	1.21	3.01*
W × SN		1.65	6.68**	4.02**	49.74**	0.14	0.11	0.75

表 5　水稻各时期秸秆腐熟量及氮素释放量与根冠比、氮素吸收利用以及产量的相关性分析

Table 5　Correlation coefficients between straw decomposition or nitrogen release accumulation and root-shoot ratio, nitrogen uptake, utilization and grain yield of rice at different growth stages

处理 Treatment		秸秆腐熟量 Straw decomposition amount				秸秆氮释放量 Nitrogen release of straw			
		移栽后 20 d 20 DAT	移栽后 30 d 30 DAT	齐穗期 HS	成熟期 RS	移栽后 20 d 20 DAT	移栽后 30 d 30 DAT	齐穗期 HS	成熟期 RS
总氮积累 Total nitrogen accumulation		0.17	0.15	0.07	0.22	−0.20	−0.29*	0.46**	0.57**
各生育阶段氮积累量 N uptake in various growing stage	移栽后 20—30 d 20–30 DAT	0.25	0.13	0.11	0.21	−0.13	−0.28*	0.31*	0.40**
	移栽后 30 d—齐穗期 30 DAT–HS	0.11	0.13	0.05	0.19	−0.13	−0.21	0.47**	0.59**
	齐穗期—成熟期 HS–RS	−0.04	−0.14	−0.19	−0.18	0.32*	0.21	0.30*	0.22
氮肥利用效率 N utilization efficiency	氮肥回收利用率 N recovery efficiency	−0.10	−0.20	−0.31*	−0.32*	0.49**	−0.04	0.00	−0.02
	氮素生理利用率 N physiological efficiency	−0.14	−0.04	0.00	0.08	−0.21	−0.10	0.32*	0.31*
根冠比 Root-shoot ratio	移栽 20 d 20 DAT	−0.06	−0.20	−0.13	−0.31*	0.52**	0.29*	−0.11	−0.21
	移栽 30 d 30 DAT	0.05	0.02	0.08	−0.09	0.22	0.09	−0.40**	−0.50**
	齐穗期 HS	−0.31*	−0.32*	−0.21	−0.28*	0.27*	0.42**	−0.12	−0.27*
	成熟期 RS	0.11	0.02	0.03	−0.02	−0.01	0.06	−0.02	−0.07

释放量，受腐熟灌溉模式、栽培模式、土壤及气候环境因子等因素的影响[10]。李逢雨等[11]对麦秆、油菜秆覆盖条件下腐熟及养分释放规律的研究表明，两种秸秆均呈前快后慢的规律，但麦秆前期腐熟较油菜秆有所降低，而在后期则麦秆腐熟明显高于油菜秆，同时研究还表明氮素释放较为缓慢；武际等[12]在对不同水稻栽培模式及还田方式对麦秆、油菜秆腐熟特征及养分释放规律的研究中还表明，淹灌与干湿交替模式对秸秆覆盖的腐熟规律有所差异，但两种栽培模式秸秆腐解率差异不大；栽培模式和还田方式对秸秆碳、氮和磷释放率的影响与对秸秆腐解率的影响规律基本一致，且油菜秆在最终腐熟量及氮素释放量均较麦秆整体有所提高。本研究表明，各灌溉模式下，麦秆、油菜秆的腐熟及氮素释放效率峰值均出现在还田前期，其峰值出现在水稻移栽后 30 d 前后。但秸秆腐熟量及氮素释放量，以及各阶段的秸秆腐熟与氮素释放效率则受灌溉模式、秸秆种类及其耦合方式影响。整体来看，淹灌模式下麦秆、油菜秆腐熟及氮素释放均为最高，干湿交替灌溉模式次之。但旱作模式下两种秸秆腐熟及氮素释放效率的幅度相对平缓，即在后期也具有较高的腐熟及氮素释放量。两种秸秆对比来看，麦秆在生育前期氮素释放量及释放率与油菜秸秆差异不大，而在生育中后期麦秆氮素释放量及释放率则明显增加。这与武际等[12]研究结果有所不同，其原因可能在于，秸秆覆盖还田过程中，秸秆腐熟呈现出近地部分逐级向上腐熟的过程，因而秸秆腐熟受与地接触面积、土壤理化环境以及堆积层厚薄的影响。同时分析秸秆覆盖优化施氮模式(即搭配基肥：蘖肥：穗肥为 3∶3∶4)来看，优化施氮模式促使秸秆的腐熟高峰期主要集中在分蘖高峰，秸秆腐熟化感作用降低水稻分蘖的发生，显著促进地下部根系的生长。而对比腐熟与氮素释放来看，两者并非呈绝对正相关关系，表明秸秆的氮素释放受上述因素的影响外，水分的浸泡以及雨水的淋溶等环境因子也是影响氮素释放的重要因素。

3.2 灌溉方式与秸秆覆盖优化施氮模式对水稻植株生长的影响

土壤水分是水稻根系生长最主要的影响因素之一，因此不同的灌溉模式显著影响水稻根系的生长。杨长明等[13]研究认为干湿交替灌溉模式与控水灌溉模式能够显著提高水稻根系活力，平均较淹水灌溉提高 23.7%与 37.9%；曾翔等[14]研究也表明湿润灌溉模式能够增大水稻生育后期根系密度。但在秸秆还田模式下，由于各灌溉模式对秸秆腐熟及养分释放规律的影响，导致其与无秸秆覆盖对根系的影响规律有所差异，如张武益等[15]研究表明，淹水灌溉模式下实施秸秆还田，较干湿交替灌溉模式增加土壤还原性有毒物质的积累，降低土壤的通气性，进而导致水稻根系活力降低。本研究表明，淹水、干湿交替灌溉模式能够明显提高根干重，但淹水灌溉同时也提高了根冠比。淹水灌溉模式及干湿交替灌溉模式下麦秆覆盖搭配基肥：蘖肥：穗肥为 3∶3∶4 氮肥管理时，较无秸秆覆盖处理其生育前期物质积累均有一定的降低，而在生育中后期则明显增加；进一步验证了秸秆腐熟对水稻生育前期具有一定的抑制作用；但在旱作模式下，油菜搭配基肥：蘖肥：穗肥为 3∶3∶4 氮肥运筹时显著高于麦秆覆盖及无秸秆覆盖处理外，其他处理均明显降低，其可能由于油菜秆全量还田时由于其较高的质量与体积导致在前期快速腐熟过程中对水稻产生较麦秆覆盖更为严重的抑制效应，且在淹水灌溉模式、干湿交替灌溉模式以及湿润的气候环境时会进一步加重抑制效应。而在旱作模式下，较高的秸秆质量与体积则呈现出一定的优势，表现为在干旱高温天气能够起到对土壤的保湿降温作用，从而保证植株正常的生理活动，改善水稻后期根系的生长及根系活力，从而提高水稻后期的干物质积累及产量形成[16]。同时本试验进一步研究表明，各灌溉模式下秸秆覆盖优化施氮模式均能够有效调节水稻地上地下部的生长，进而显著提高稻谷产量；但不同灌溉模式下，麦秆、油菜秆搭配优化施氮模式表现则有所差异，其中淹水灌溉与干湿交替模式下以麦秆覆盖增产效果最为显著，旱作模式以油菜秆覆盖最佳，均表现为有效穗数、千粒重等方面的显著增加。而在水分利用效率方面也表现为秸秆覆盖氮肥优化管理能有效提高水分生产效率，特别是在干湿交替下麦秆覆盖与旱作模式下油菜秆覆盖能够显著提高水分生产效率。

3.3 灌溉方式与秸秆覆盖优化施氮模式对水稻氮素积累及其利用效率的影响

不同灌溉方式对水稻氮素吸收及利用效率方面有分歧。陈星等[17]研究表明，淹水灌溉较控水灌溉方式，其植株氮素积累量、氮素利用效率以及氮肥吸收率均显著提高。但潘圣刚等[18]研究表明干湿交替灌溉模式较常规淹水灌溉模式显著提高了水稻植株的氮素总吸收量以及氮素利用效率，其中总氮吸收量分别增加 18.5%与 22.1%。王允青等[5]研究表明在无水层秸秆还田麦秆覆盖能够显著提高植株氮、磷、钾的吸收，其中植株总氮积累量较无秸秆覆盖增长 6.8%~12.6%。本试验研究表明，干湿交替与淹

水灌溉在总氮积累量、氮素利用效率与氮素回收利用效率方面均较旱作有明显提高, 且干湿交替灌溉模式在各生育阶段氮素积累量均较其他灌溉模式明显提高, 但在生育中期, 旱作模式植株氮素积累量较淹水灌溉有明显增加, 该结果与前人研究有所差异, 表明秸秆覆盖的较好恒温保湿作用, 以及平缓的秸秆腐熟与氮素释放促进水稻生长及根系活力, 进而促进水稻的氮素积累。此外, 淹水灌溉模式与干湿交替模式均以麦秆覆盖搭配基肥∶蘖肥∶穗肥3∶3∶4 氮肥管理时, 均表现为显著提高植株的氮素积累量与氮素利用效率, 但油菜秆覆盖处理在淹水及干湿交替灌溉模式下则均显著降低, 而在旱作模式下则以油菜覆盖最优, 其可能是由于油菜秆全量还田时其较高的质量以及体积, 其覆盖于地表进一步导致淹水灌溉模式及干湿交替灌溉模式下土壤温度的进一步降低, 以及湿润的环境加快油菜秆的大量腐熟, 导致大量有害物质聚集, 植株根系活力降低以及根系生长速度减缓, 进而导致氮素吸收的减缓, 最终氮素积累量显著降低。

3.4　秸秆腐熟及氮素释放与水稻产量及氮素吸收利用的关系

秸秆覆盖对水稻生长的影响主要分为直接影响与间接影响, 如秸秆腐熟的氮、磷、钾等养分及微量元素的释放对水稻的影响为直接影响, 而秸秆腐熟过程中由于土壤微生物菌落结构等的改变进而影响水稻生长为间接影响[19–24]。但秸秆的腐熟及养分释放水稻不同时期的影响则有所差异, 表现为前期对水稻生长呈一定的负相关关系, 而对生育中后期生长及产量则呈显著正相关关系[20–24]。本研究结合各处理植株地上、地下部生长与氮素积累情况及其与秸秆腐熟及氮素释放的相关分析, 进一步对各时期秸秆腐熟及氮素释放对水稻生长的影响进行分析, 秸秆的各时期腐熟量对水稻产量及氮素吸收影响较小, 但对水稻根冠比的影响较为明显, 其中对移栽后 30 d 与齐穗期根冠比影响最为显著, 但其影响表现为非对应关系, 表明秸秆腐熟量对水稻影响主要是通过间接影响途径影响水稻地上和地下部生长; 总体来看, 在移栽后 20 d、30 d 秸秆氮素的大量或快速释放对水稻生长不利, 而齐穗期及成熟期氮素释放量显著或极显著地促进水稻产量及氮素的吸收利用。同时各时期秸秆氮素释放量对水稻根冠比影响显著, 表明秸秆氮素释放量不仅直接影响水稻各时期氮素吸收, 同时也通过间接的方式影响水稻地上和地下部的生长, 进而影响水稻产量及氮素吸收利用。因此, 协调秸秆水稻各时期秸秆腐熟量及氮素释放, 特别是移栽后 30 d 氮素释放量是保证实现水稻高产、高效的重要措施之一。

4　结论

干湿交替灌溉模式能够有效协调水稻各时期根系生长, 促进各时期氮素吸收利用, 提高稻谷产量以及水稻水分生产效率, 淹水灌溉模式次之。但在秸秆腐熟及氮素释放方面, 麦秆、油菜秆则在淹水灌溉模式下其腐熟及氮素释放方面均较其他两种灌溉模式有明显提高。而对比不同秸秆覆盖与氮肥运筹优化管理, 施氮量为 135 kg·hm^{-2} 下, 麦秆覆盖搭配氮肥运筹为基肥∶蘖肥∶穗肥为 3∶3∶4 优化管理时在各灌溉模式下均有明显的优势, 为本试验的最佳管理模式; 而油菜秆搭配该氮肥运筹优化管理仅在旱作模式下表现出较强的优势, 因而可为水资源不足区域实施秸秆还田作参考。秸秆覆盖及氮素释放与水稻各生长因子相关分析表明, 协调好移栽后 30 d 及后期秸秆氮素释放量, 能够有效提高水稻产量及氮素吸收利用。

参考文献　References

[1] 张寿全, 黄巍. 中国水资源的可持续利用研究[J]. 中国人口·资源与环境, 1999, 9(2): 21–25
Zhang S Q, Huang W. Some issues on model of sustainable utilization of water resources in China[J]. China Population, Resources and Environment, 1999, 9(2): 21–25

[2] 谢光辉, 韩东倩, 王晓玉, 等. 中国禾谷类大田作物收获指数和秸秆系数[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(1): 1–8
Xie G H, Han D Q, Wang X Y, et al. Harvest index and residue factor of cereal crops in China[J]. Journal of China Agricultural University, 2011, 16(1): 1–8

[3] 高利伟, 马林, 张卫峰, 等. 中国作物秸秆养分资源数量估算及其利用状况[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 173–179
Gao L W, Ma L, Zhang W F, et al. Estimation of nutrient resource quantity of crop straw and its utilization situation in China[J]. Transactions of the CSAE, 2009, *25*(7): 173–179

[4] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴—2012[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012: 13–16
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook–2012[M]. Beijing: China Statistics Press, 2012: 13–16

[5] 王允青, 郭熙盛. 不同水分管理条件下秸秆还田方式对作物养分吸收、产量及土壤培肥的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(12): 153–157
Wang Y Q, Guo X S. Effects of straw-returning manner on nutrient uptake, yield and soil fertility maintaining under different water managements[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(12): 153–157

[6] Polthanee A, Tre-loges V, Promsena K. Effect of rice straw management and organic fertilizer application on growth and yield of dry direct-seeded rice[J]. Paddy and Water Environment, 2008, 6(2): 237–241

[7] 汤宏, 沈健林, 张扬珠, 等. 秸秆还田与水分管理对稻田土壤微生物量碳、氮及溶解性有机碳、氮的影响[J]. 水土保

持学报, 2013, 27(1): 240–246
Tang H, Shen J L, Zhang Y Z, et al. Effect of rice straw incorporation and water management on soil microbial biomass carbon, nitrogen and dissolved organic carbon, nitrogen in rice paddy field[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(1): 240–246

[8] 李旭毅, 孙永健, 程洪彪, 等. 两种生态条件下氮素调控对不同栽培方式水稻干物质积累和产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 773–781
Li X Y, Sun Y J, Cheng H B, et al. Effects of nitrogen regulation on dry matter accumulation and grain yield of rice under different cultivation models and two kinds of ecological conditions[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(4): 773–781

[9] 严奉君, 孙永健, 马均, 等. 秸秆覆盖与氮肥运筹对杂交稻根系生长及氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 23–35
Yan F J, Sun Y J, Ma J, et al. Effects of straw mulch and nitrogen management on root growth and nitrogen utilization characteristics of hybrid rice[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(1): 23–35

[10] Andrén O, Rajkai K, Kätterer T. Water and temperature dynamics in a clay soil under winter wheat: Influence on straw decomposition and N immobilization[J]. Biology and Fertility of Soils, 1993, 15(1): 1–8

[11] 李逢雨, 孙锡发, 冯文强, 等. 麦秆、油菜秆还田腐解速率及养分释放规律研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2): 374–380
Li F Y, Sun X F, Feng W Q, et al. Nutrient release patterns and decomposing rates of wheat and rapeseed straw[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(2): 374–380

[12] 武际, 郭熙盛, 鲁剑巍. 水旱轮作制下连续秸秆覆盖对土壤理化性质和作物产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(3): 587–594
Wu J, Guo X S, Lu J W. Effects of continuous straw mulching on soil physical and chemical properties and crop yields in paddy-upland rotation system[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(3): 587–594

[13] 杨长明, 杨林章, 欧阳竹. 不同养分与水分管理对水稻植株根系形态及其活力的影响[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(4): 82–85
Yang C M, Yang L Z, Ouyang Z. Effects of different nutrient and water regimes on the morphology and activity of rice root system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2004, 12(4): 82–85

[14] 曾翔, 李阳生, 谢小立, 等. 不同灌溉模式对杂交水稻生育后期根系生理特性和剑叶光合特性的影响[J]. 中国水稻科学, 2003, 17(4): 335–359
Zeng X, Li Y S, Xie X L, et al. Effects of different irrigation patterns on physiological characteristics of root and photosynthetic traits of flag leaf after flowering stage in hybrid rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2003, 17(4): 335–359

[15] 张武益, 朱利群, 王伟, 等. 不同灌溉方式和秸秆还田对水稻生长的影响[J]. 作物杂志, 2014(2): 113–118
Zhang W Y, Zhu L Q, Wang W, et al. Effect of wheat straw returning under different irrigation methods on rice growth[J]. Crops, 2014(2): 113–118

[16] 蔡昆争, 骆世明, 段舜山. 水稻群体根系特征与地上部生长发育和产量的关系[J]. 华南农业大学学报, 2005, 26(2): 1–4
Cai K Z, Luo S M, Duan S S. The relationship between root system of rice and aboveground characteristics and yield[J]. Journal of South China Agricultural University, 2005, 26(2): 1–4

[17] 陈星, 李亚娟, 刘丽, 等. 灌溉模式和供氮水平对水稻氮素利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 283–290
Chen X, Li Y J, Liu L, et al. Effects of water management patterns and nitrogen fertilizer levels on nitrogen use efficiency of rice[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(2): 283–290

[18] 潘圣刚, 曹凑贵, 蔡明历, 等. 不同灌溉模式下氮肥水平对水稻氮素利用效率、产量及其品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2): 283–289
Pan S G, Cao C G, Cai M L, et al. Effects of nitrogen application on nitrogen use efficiency, grain yields and qualities of rice under different water regimes[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(2): 283–289

[19] 陈培峰, 董明辉, 顾俊荣, 等. 麦秸还田与氮肥运筹对超级稻强–弱势粒粒重与品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2012, 26(6): 715–722
Chen P F, Dong M H, Gu J R, et al. Effects of returning wheat residue to field and nitrogen management on grain weight and quality of superior and inferior grains in super rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2012, 26(6): 715–722

[20] 李勇, 曹红娣, 邓九胜, 等. 小麦秸秆全量还田对土壤速效氮及水稻产量的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2009, 25(4): 46–51
Li Y, Cao H D, Deng J S, et al. Effect of return of total wheat straw on soil mineral nitrogen dynamics and rice yield[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2009, 25(4): 46–51

[21] 潘圣刚, 黄胜奇, 汪金平, 等. 不同灌溉模式下氮肥水平对水稻生物学特性及水分利用效率的影响[J]. 干旱区研究, 2012, 29(1): 161–166
Pan S G, Huang S Q, Wang J P, et al. Effects of nitrogenous fertilizer application on biological properties and water use efficiency of rice under different water regimes[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(1): 161–166

[22] 谭军利, 王林权, 李生秀. 不同灌溉模式下水分养分的运移及其利用[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(4): 442–448
Tan J L, Wang L Q, Li S X. Movement and utilization of water and nutrient under different irrigation patterns[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(4): 442–448

[23] 赵锋, 程建平, 张国忠, 等. 氮肥运筹和秸秆还田对直播稻氮素利用和产量的影响[J]. 湖南农业科学, 2011, 50(18): 3701–3704
Zhao F, Cheng J P, Zhang G Z, et al. Effect of nitrogen fertilizer regimes and returning straw on N availability and forming yield of direct-sowing rice[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2011, 50(18): 3701–3704

[24] 徐国伟, 翟志华, 杨久军, 等. 秸秆还田量对直播稻苗期生长和土壤的影响[J]. 广东农业科学, 2015, 42(19): 1–7
Xu G W, Zhai Z H, Yang J J, et al. Effects of different amount of wheat-residue application on growth of direct-seeding rice and characteristics of soil[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2015, 42(19): 1–7